Распределение концентрации адатомов и поверхностных вакансий на экстремально широких террасах поверхности Si(111) в процессе сублимации

Макеев М.А.^{1,2}, Роголо Д.И.¹, Федина Л.И.^{1,2}, Пономарёв С.А.^{1,2}, Щеглов Д.В.¹, Латышев А.В.^{1,2}

¹ ИФП СО РАН, 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

DOI 10.34077/Semicond2019-113

Методами *in situ* сверхвысоковакуумной отражательной электронной микроскопии (СВВ ОЭМ) и *ex situ* атомно-силовой микроскопии изучено распределение концентрации адатомов n на экстремально широких круглых террасах поверхности Si(111) (диаметром ~ 100 мкм), быстро охлаждённых ($\sim 400^\circ\text{C}/\text{с}$) от температур сублимации в интервале ($1020\text{--}1110^\circ\text{C}$). На основе полученных экспериментально зависимостей $n(r)$ и времён жизни адатомов до десорбции определено, что при увеличении температуры от 1020°C до 1110°C длина диффузии адатома уменьшается от 60 мкм до 22 мкм, а коэффициент поверхностной диффузии увеличивается от $85\text{ мкм}^2/\text{с}$ до $125\text{ мкм}^2/\text{с}$, соответственно. На основе этих данных определена энергия десорбции адатома $\epsilon_{des} \approx 3.6$ эВ и энергия активации поверхностной диффузии $\epsilon_{dif} \approx 1.1$ эВ.

В интервале температур $840\text{--}1110^\circ\text{C}$ измерена температурная зависимость равновесной концентрации адатомов $n_{eq}(T)$ на террасах поверхности Si(111) шириной ~ 1 мкм. Экспериментально показано, что n_{eq} монотонно растёт с температурой от 0.08 БС при 840°C до 0.20 БС при 1110°C ($1\text{ БС} = 1.56 \times 10^{15}\text{ см}^{-2}$), что соответствует энергии формирования адатома

$\epsilon_{des} \approx 0.4$ эВ. Хотя полученные значения ϵ_{ad} , ϵ_{des} и ϵ_{dif} существенно отличаются от предыдущих оценок, их линейные комбинации $\epsilon_{dif} + \epsilon_{ad} \approx 1.5$ эВ и $\epsilon_{des} - \epsilon_{dif} \approx 2.6$ эВ хорошо согласуются с наиболее прецизионными опубликованными данными (1.53 эВ и 2.56 эВ, соответственно) [1].

Экспериментально получено распределение концентрации доменов сверхструктуры 7×7 $n_{7 \times 7}$, зародившихся при $T = 830^\circ\text{C}$ в процессе быстрого охлаждения террасы Si(111) диаметром 100 мкм. С использованием того, что зарождение и стабилизация сверхструктурного домена требует формирования тетравакансии [2], впервые рассчитано распределение концентрации поверхностных вакансий $n_v(r) \sim n_{7 \times 7}^{1/4}$. Показано, что концентрация поверхностных вакансий n_v достигает максимума в центре террасы ($n_v \sim 0.03$ БС) и имеет минимум вблизи моноатомной ступени ($n_v \sim 0.02$ БС), что соответствует энергии формирования адатомно-вакансионной пары ≥ 0.5 эВ.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Наноструктуры» при поддержке *in situ* ОЭМ исследований Российским научным фондом (грант № 14-22-00143) и *ex situ* АСМ анализа Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 16-02-00518).

[1] A.B. Pang et al., Phys. Rev. B., 77, 115424 (2008).

Рис.1. – Топографическое АСМ изображение круглой террасы Si(111) диаметром 51 мкм, быстро охлажденной от 1090°C .